

## ВПЛИВ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУГ ПРИ ФОТОЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ ВИТРАВЛЮВАННІ МАКРОПОР У КРЕМНІЙ $n$ -ТИПУ НА ДОСКОНАЛІСТЬ ЙОГО КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ

К. П. Конін, к. т. н. О. О. Литвиненко, Д. В. Морозовська,  
к. ф.-м. н. О. Й. Гудименко, О. Й. Стронська

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  
Україна, м. Київ  
dim1561@ukr.net

*Досліджено посттехнологічні зміни в кристалічній ґратці  $n$ -кремнію в макропористих структурах за різних режимів витравлювання макропор. Встановлено, що механічні напруги та відповідні деформації в масиві кремнію релаксують через появу дислокацій. Рентгеноструктурні дослідження вказують на залишкові зміни ґратки на субнанометровому рівні.*

*Ключові слова: макропористий кремній, залишкові дефекти, дислокації.*

Структури макропористого кремнію, як регулярні (фотонні кристали), так і зі стохастичним розташуванням пор, широко досліджуються в останні десятиріччя і є перспективними для практичного застосування. При цьому питання якості структур є чи не найважливішим. При виготовленні макропористих структур на основі кремнію  $n$ -типу у фотоелектрохімічному процесі вихідні кристали піддаються термомеханічним навантаженням, що викликають напруження та деформації внаслідок теплового впливу освітлювача та джоулевого тепла від струму. В цій роботі досліджувалися посттехнологічні зміни кристалічної ґратки в макропористому кремнії за різних режимів витравлювання макропор, які охоплюють весь допустимий діапазон напруг і струмів.

Було досліджено кремній  $n$ -типу,  $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , (100), в пластинах товщиною  $500 \text{ мкм}$ . Макропори з  $h \approx 70 \text{ мкм}$  та  $d \approx 3 \text{ мкм}$  отримували методом фотоелектрохімічного витравлювання в 5%-му розчині HF з додаванням поверхнево-активної речовини в триелектродній електрохімічній комірці в стандартних режимах [1]. Інтенсивність світла галогенної лампи потужністю  $50 \text{ Вт}$  залишалася постійною. Поглинання такого світла в кремнії переважно є поверхневим, його тепловий ефект — постійним і зосередженим в межах глибини поглинання. Розширення чіпа внаслідок поверхневого нагріву призводить до сферичного вигину опуклістю в бік освітлювача, оскільки протилежна поверхня чіпа, що омивається травником, знаходиться при температурі розчину. Друге джерело теплового навантаження на чіп — джоулево тепло від протікання струму — об'ємне, але його внесок до деформації істотний, про що свідчить зростання дефектності зі збільшенням струму.

У потенціостатичному режимі за напруги  $0,30\text{—}0,35 \text{ В}$  макропори відсутні або мають невисоку щільність. За напруги  $0,4 \text{ В}$  щільність і розміри пор змінюються і набувають вигляду, що відповідає питомому опору кремнію [2], а за напруги  $0,7\text{—}0,9 \text{ В}$  виникають фігури витравлювання у вигляді вписаних неспіввісних кіл (рис. 1). Відомо [3], що зародки витравлювання, а згодом і макропори, розвиваються переважно в місцях розташування дефектів. Час, необхідний для початку формування макропор (біля  $1 \text{ хв}$ ) значно більший ніж для початку формування дислокацій (долі секунди), тому макропори переважно утворюються на слідах виходу дислокацій на поверхню і таким чином автоматично проявляють їх.

За більшої напруги у потенціостатичному режимі (отже, за більшого теплового навантаження) зменшується кількість петель спіралі у фігурах витравлювання, і багатопетельні спіралі поступово стягуються в об'єднану циркулярну структуру, тобто спіралеподібні дислокації вироджуються у циліндричні (рис. 1).

Гальваностатичний режим відрізняється від потенціостатичного набагато більшою джоулевою компонентою теплового навантаження саме на початку витравлювання. Відповідно, виникають дислокації виродженого типу — замість множини гілок (рис. 1) спостерігаються кругові фігури витрав-

лювання більшого діаметра (рис. 2). При цьому входи макропор, що виявляють дислокації, розташовуються не тільки по круговому сліду дислокації, а й у точці виходу вісі дислокації.

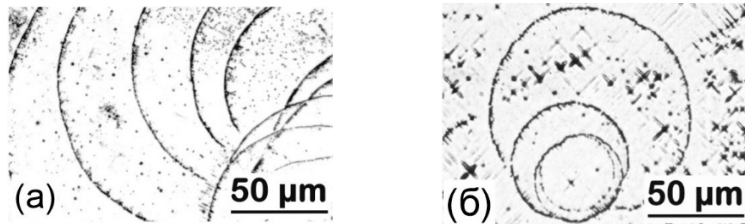


Рис. 1

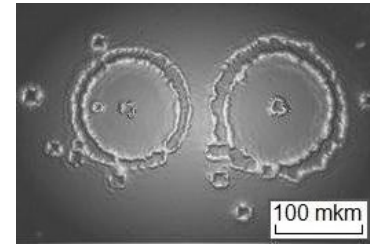


Рис. 2

Дані про деформації ґратки після витравлювання макропор отримано методом рентгенівської дифракції. На рис. 3 представлено порівняльні криві рентгенівського сканування монокристалічної та поруватої ділянки зразків. Напівширина кривої качання паралельно вектору дифракції (криві  $2\theta$ -сканування, рис. 3, а) характеризує механічні напруги у кристалічній ґратці, а напівширина кривої качання перпендикулярно йому (криві  $\omega$ -сканування, рис. 3, б) характеризує дефекти розорієнтаційного типу та поворотні деформації. За результатами сканування в режимі високої роздільної здатності (криві  $2\theta$ , рис. 3, в) отримано параметри ґратки досліджуваних областей кристала. Результати вказують на неоднорідність деформації в області витравлювання.

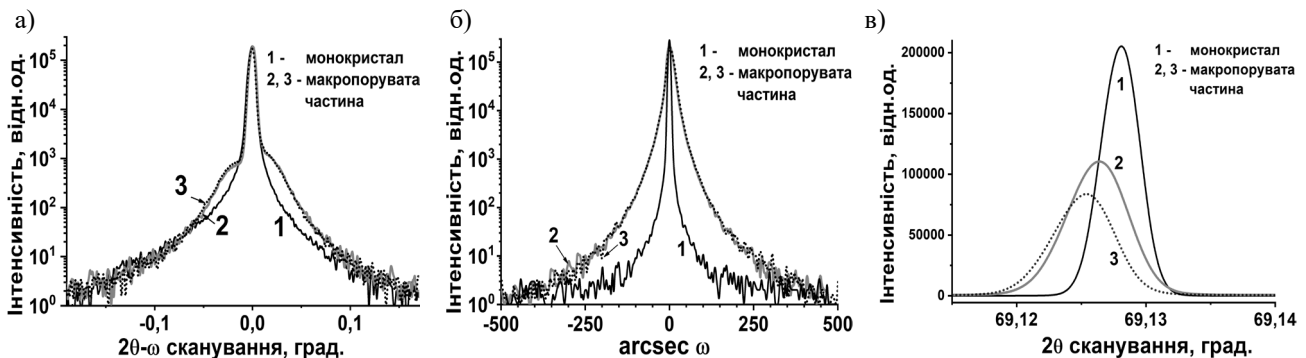


Рис. 3

Отримані результати свідчать про залишкові зміни ґратки на субнанометровому рівні і вказують на начебто парадокс. Величини деформацій розорієнтації при м'якому витравлюванні виявляються більшими, ніж при жорсткіших режимах витравлювання, коли з'являються великомасштабні дефекти у вигляді циліндричних дислокацій. Це пояснюється тим, що механічні напруження релаксують через утворення дислокацій, які виникають під час витравлювання у відповідних режимах.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Lehmann V. The physics of macropore formation in low doped n-type silicon. *J. Electrochem.Soc.*, 1993, vol. 140, N 10, 2836.
2. Konin K.P., Gudymenko O.Yo., Klad'ko V.P. et al. Residual deformations and mechanical stresses in macroporous and nonporous silicon under normal etching conditions. *Journal of Electronic Materials*, 2020, vol. 49, p. 5240–5243. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08319-z>
3. Amelinckx S. *The direct observation of dislocations*. Acad.Press, N.Y., 1964.

K. P. Konin, O. O. Lytvynenko, D. V. Morozovska, O. Y. Gudymenko, O. Y. Stronska

#### Influence of thermo-mechanical stresses during photoelectrochemical etching of macropores in n-type silicon on the perfection of its crystalline structure

*The residual changes in the crystal lattice of n-silicon in macroporous structures were investigated under various modes of macropore etching. The mechanical stresses and corresponding deformations in the silicon volume relax through the appearance of spiral dislocations were found. X-ray diffraction studies indicate the residual lattice changes.*

*Keywords: macroporous silicon, residual defects, dislocations.*